

**УДК 664.8.047**

## **ТЕПЛОМАСООБМІН ПІД ЧАС СУШІННЯ ЧИПСІВ З ЯБЛУК**

**Гусарова О.В., Шапар Р.О.**

**Інститут технічної теплофізики НАН України,**

**вул. Булаховського, 2, м. Київ, 03164, Україна**

Процес сушіння це сукупність пов'язаних одне з одним явищ, що розвиваються як усередині матеріалу, так і в сушильній камері: зовнішній масообмін (випаровування вологи), зовнішній теплообмін (між нагрітим теплоносієм і поверхнею матеріалу), внутрішній тепломасообмін (випаровування вологи з поверхні матеріалу), а також процеси тепломасообміну між матеріалом і сушильним агентом. Через складність процесу розрахунок тривалості зневоднення ускладнений. Для розрахунків використовують наближені методи, які базуються на вивченні загальних закономірностей процесу.

Для розрахунку тривалості сушіння та аналізу основних закономірностей кінетики зневоднення під час одержання чипсів із яблук було використано метод В.В. Краснікова [1]. На підставі експериментальних кривих метод дозволяє знайти тривалість сушіння матеріалу від початкової вологості  $W_n$  до кінцевої вологості  $W_k$ .

За отриманими експериментальними кривими зневоднення яблук було побудовано узагальнену криву кінетики сушіння та представлено її в напівлогарифмічній системі координат  $W^c - N\tau$ , що дозволило визначити критичні вологості в точках перегину, відносні коефіцієнти сушіння та залежність для визначення тривалості процесу. Характер побудованої кривої підтвердив протікання процесу сушіння яблук у другому періоді падаючої швидкості. Другий період складається з трьох частин, на графіку добре видно точки перегину, які відповідають критичним вологостям.

Значення відносних коефіцієнтів сушіння  $\chi_2$ ,  $\chi_3$  та  $\chi_4$  розрахованих за формулами з [1] наведено в таблиці 1.

Загальна тривалість процесу сушіння яблук буде:

$$\tau_3 = \frac{1}{N_{\max}} \left( \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_n}{W_{\text{кр1}}} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{\text{кр1}}}{W_{\text{кр2}}} + \frac{1}{\chi_4} \lg \frac{W_{\text{кр2}}}{W_k} \right), \quad (1)$$

де  $N_{\max}$  – максимальна швидкість сушіння,  $W_{\text{кр1}}$ ,  $W_{\text{кр2}}$  – перша та друга критичні вологості у критичних точках  $K_1$ ,  $K_2$  (визначено з графіка). Значення критичних вологостей  $W_{\text{кр1}} = 125\%$  та  $W_{\text{кр2}} = 25\%$ .

Таблиця 1 – Значення відносних коефіцієнтів сушіння яблук

Діапазон критичних вологостей, %	Величина відносних коефіцієнтів сушіння		
	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$
530...125			
125...25	$13,9 \cdot 10^{-4}$	$14,3 \cdot 10^{-4}$	$15,5 \cdot 10^{-4}$
25...6			

Підставивши у вираз (1) всі шукані величини, отримали загальний час сушіння яблук:

$$\tau_3 = \frac{1335}{N_{\max}} \quad (2)$$

Використовуючи отриману залежність (2), можна заздалегідь оцінити тривалість процесу сушіння яблук під час виробництва чипсів при зміні режимів зневоднення.

За результатами кінетики вологообміну легко перейти до розрахунку кінетики теплообміну при сушінні яблук. Основне рівняння кінетики сушіння встановлює зв'язок між теплообміном  $q_F$  і масообміном  $d\bar{U}/d\tau$  за допомогою безрозмірної величини, яка називається числом Ребіндера, [2, 3]:

$$\text{Rb} = \frac{c_{\text{еф}}}{r} \frac{d\bar{t}}{d\bar{U}}, \quad (3)$$

де  $c_{\text{еф}}$  – ефективна теплоємність вологого тіла,  $r$  – питома теплоти випаровування води з яблук,  $\bar{U}$  – середній питомий вологовміст матеріалу,  $t$  – температура.

Число Ребіндера визначає відношення кількості теплоти, яке пішло на нагрів матеріалу до кількості теплоти витраченої на випаровування вологи з нього за нескінченно малий проміжок часу. Число Rb за А.В.Ликовим [2] є основним критерієм сушіння, і його часто називають критерієм оптимізації

**Збірник тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"**  
процесу сушіння. Величина числа Ребіндера залежить від температурного коефіцієнта сушіння  $b$ , питомої теплоємності вологого матеріалу  $c$  та питомої теплоти випаровування  $r$ , тобто від форм зв'язку вологи з матеріалом [3].

Розраховано значення та побудовано залежності числа Ребіндера від вологості зразка для стаціонарних та стадійного режимів зневоднення. Вперше при розрахунку числа Ребіндера було використано реальні значення питомої теплоти випаровування води з яблук [4]. Розрахунок числа  $Rb$  показав, що його значення залежать від температури сушильного агента та вологості матеріалу.

На підставі аналізу отриманих кривих обґрунтовано доцільність використання стадійних режимів зневоднення яблук. Зниження температури сушильного агента приводить до зниження числа  $Rb$ . При наближенні температури матеріалу до гранично допустимої, температуру сушильного агента потрібно знижувати, а на початку процесу, до досягнення зразками граничної температури, можна використовувати високу температуру сушильного агента.

Використання стадійних режимів сушіння знижує питомі теплові витрати на випаровування 1 кг вологи від 15 до 25 %, забезпечує скорочення тривалості процесу до 20 % та зростання швидкості зневоднення.

#### **Перелік посилань:**

1. Красников В. В. Кондуктивная сушка / Красников В. В.; под ред. И. В. Волобуева – Москва: Энергия, 1973. – 288 с.
2. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / Лыков А. В. – Москва: Государственное энергетическое издательство, 1956. – 464 с.
3. Снежкін Ю.Ф., Шапар Р. О.Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини // Київ: Сік Груп Україна, 2018. – 228 с.
4. Гусарова О.В., Дмитренко Н.В., Шапар Р.О. Вплив бланшування яблук на теплоту випаровування води та кінетику процесу сушіння // Теплофізика та теплоенергетика, – 2019. – Т. 41, № 5. – С. 86.